

UNIVERSITATEA TRANSILVANIA DIN BRAŞOV



FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR

DEPARTAMENT AUTOMATICĂ ȘI INFORMATICĂ APLICATĂ

---

Proiect *Actionare electrică reglabilă reversibilă cu convertor fără curenti de circulație*

---

*Autor*

Andrei VASILCOI

Decembrie 2018, Brașov

## Cuprins

<b>1</b>	<b>Tema proiectului</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Generalitati</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Motorul de curent continuu cu excitatie separata</b>	
	<b>Ecuatii diferențiale si schema bloc</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Caracteristici mecanice stationare la comanda pe indus</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Reglarea turatiei motoarelor de curent continuu</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Reglarea turatiei prin comanda pe indus</b>	<b>8</b>
<b>7</b>	<b>Breviar de calcul</b>	<b>13</b>

## 1 Tema proiectului

Sa se proiecte o actionare electrica reglabilă reversibila cu convertor fara curenti de circulatie. Proiectul va cuprinde:

- calculul circuitului de reglare al curentului;
- calculul circuitului de reglare al turatiei.

Se va folosi un motor de c.c. cu excitatie independenta comandat pe indus, utilizand ca element de executie o punte cu tiristoare complet comandata.

Tab. 1: Date de proiectare

P	$U_N$	$\eta$	n	$GD_r^2$	$GD_s^2$	$\Delta n$	$\sigma$	$\epsilon_{st}$	$I_{lim}/I_n$	Precizia
3.7	190	0.77	2500	0.13	0.07	190-2500	6	0	1.5	5

## 2 Generalitati

Motoarele de curent continuu se utilizeaza frecvent in actionarii electrice reglabile datorita proprietatilor lor favorabile (reglare fina si in limite largi a turatiei.). Dezavantajul principal al acestor motoare il constituie prezenta colectorului, care limiteaza superior puterea si turatia si maresteste momentul de inerte.

In figura 1.a este reprezentata principal o masina de curent continuu cu doi poli avand statorul S si indusul cilindric A. Indusul si polii sunt confectionati din tole pentru a micsora pierderile in fier. La masinile de puteri mari si cu calitati dinamice superioare se confectioneaza si restul statorului din tole. Polii principali P sunt prevazuti cu infasurarea de excitatie, parcursa de curentul de excitatie  $I_e$ , care produce fluxul magnetic principal  $\Phi_e$ . Acest flux se inchide prin rotor (indus) si stator. In crestaturile indusului este plasata infasurarea indusului care, prin intermediul colectorului si a periilor p, este alimentata (in functionarea ca motor) de la retea cu curentul  $I_a$ .

Conductoarele indusului sunt repartizate uniform de-a lungul intregii circumferinte a indusului si rezulta o repartizare uniform de-a lungul intregii circumferinte a indusului si rezulta o repartizare a curentului dupa cum se indica in figura 1.a. O asemenea repartizare produce un camp de reactie a indusului a carui axa este perpendiculara pe axa campului inductor principal.

Fluxul de reactie transversal corespunzator  $\Phi_a$  este, datorita intrefierului mare in directia transversala, mult mai mic decat fluxul de excitatie  $\Phi_e$ . Infaurarea de compensatie C, plasata in piesele polare si parcursa de curentul prin indus  $I_a$ , reduce si mai mult fluxul in directia transversala. In general numai masinile mari sunt prevazute cu infasurari de compensatie. Campul magnetic in zona de comutatie este influentat de polii auxiliari PA, excitati de curentul prin indus, pentru a se atinge o comutatie fara scantei.

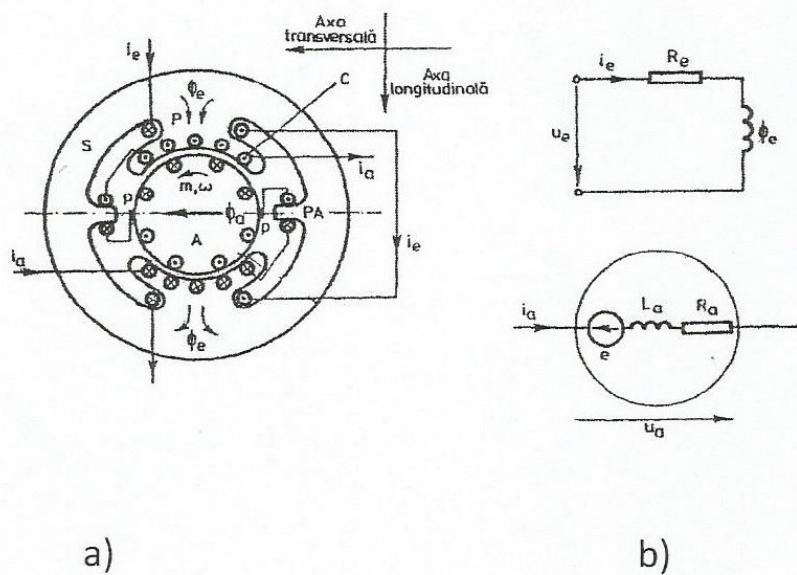


Fig. 1: Masina de curent continuu, cu excitatie separata

Actiunea inductiva a indusului poate fi reprezentata printr-o inductivitate concentrata  $L_a$ . Deoarece infasurarea de compensatie si infasurarea polilor auxiliari se gasesc de asemenea in axa periilor

(transversala) actiunea lor se posta lăua în considerare prin  $L_a$ .

### 3 Motorul de curent continuu cu excitatie separata Ecuatii diferențiale si schema bloc

Schimbul echivalent al motorului de curent continuu cu excitatie separata (independenta), care a fost deja reprezentata in figura 1.b, se modifica in sensul ca parametrii concentrati  $R_a$  si  $L_a$  se reprezinta in afara indusului (figura 2)

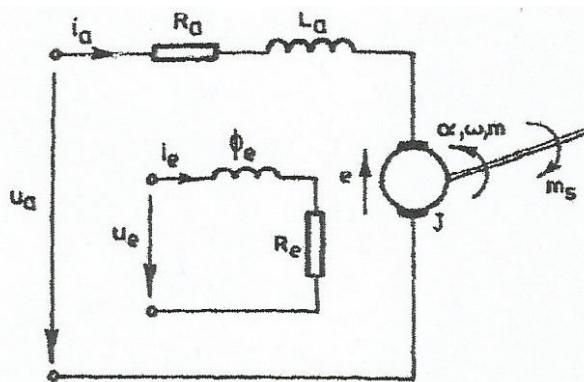


Fig. 2: Schema echivalenta a motorului de curent continuu cu excitatie separata

Ca marimi de intrare actioneaza tensiunea aplicata indusului  $u_a$ , tensiunea aplicata circuitului de excitatie  $u_e$  si cuplul de sarcina  $m_s \cdot \Phi_e$  este fluxul de excitatie,  $m$  este cuplul electromagnetic al motorului , iar  $J$  momentul de inertie a maselor cu miscare de rotatie. Aplicand teorema a doua a lui Kirchhoff circuitului indusului rezulta:

$$u_a = e + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

unde s-a neglijat caderea de tensiune la perile masinii, care depinde neliniar de curentul prin indus.

In acelasi mod, pentru circuitul de excitatie se obtine:

$$u_e = R_e i_e + \frac{d\Phi_e}{dt} \quad (2)$$

Tensiunea electromotoare indusa prin rotatie va fi:

$$e = k \Phi_e \omega, \text{ cu } k = \frac{pN}{2\pi a} \quad (3)$$

unde:

- N - numarul de conductoare active ale infasurarii indusului;
- p - numarul de perechi de poli;
- a - numarul de perechi de cai de curent ale infasurarii indusului;
- $\omega$  - viteza unghiulara a indusului (rotorului)

Cuplul electromagnetic exercitat asupra rotorului motorului este:

$$m = k\Phi_e i_a \quad (4)$$

Ecuatia de miscare se poate scrie sub forma:

$$m - m_s = J \frac{d\omega}{dt} \quad (5)$$

Ecuatia vitezei unghiulare este:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} \quad (6)$$

Ecuatia (1) se poate pune sub forma:

$$T_a \frac{di_a}{dt} + i_a = \frac{1}{R_a}(u_a - e) \quad (7)$$

Unde  $T_a = L_a/R_a$  este constanta de timp a circuitului inducatorului. Ecuatia (2) scrisa sub forma:

$$\frac{d\Phi_e}{dt} = u_e - R_e i_e \quad (8)$$

reprezinta ecuatia diferențiala a unui element de integrare (integrator).

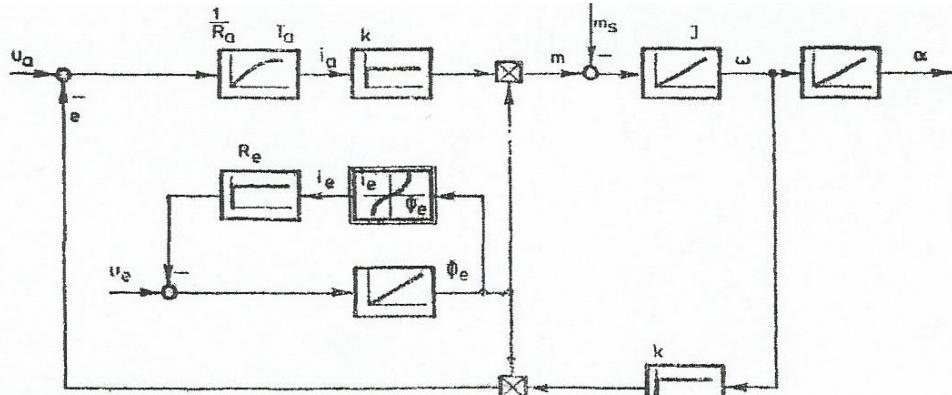


Fig. 3: Schema bloc a motorului de curent continuu cu excitatie separata (marimi absolute).

Ecuatiile (7), (8), (3), (4), (6) descriu comportarea dinamica a motorului de curent continuu cu excitatie separata. Schema structura sa se poate scrie sub forma bloc corespunzatoare acestor ecuatii diferențiale cuplate este ilustrata in Fig. 3.

Marimile variabile care apar in schema bloc din figura 3 au diferite dimensiuni. Pastrarea neschimбata a acestor marimi ar complica calculul prin relatii dimensionale complicate. Din aceasta cauza se obisnuieste ca toate marimile sa se raporteze, adica sa devina marimi adimensionale. Se ajunge astfel la sistem de unitati relative care usureaza calculele, in special cele efectuate pe calculator.

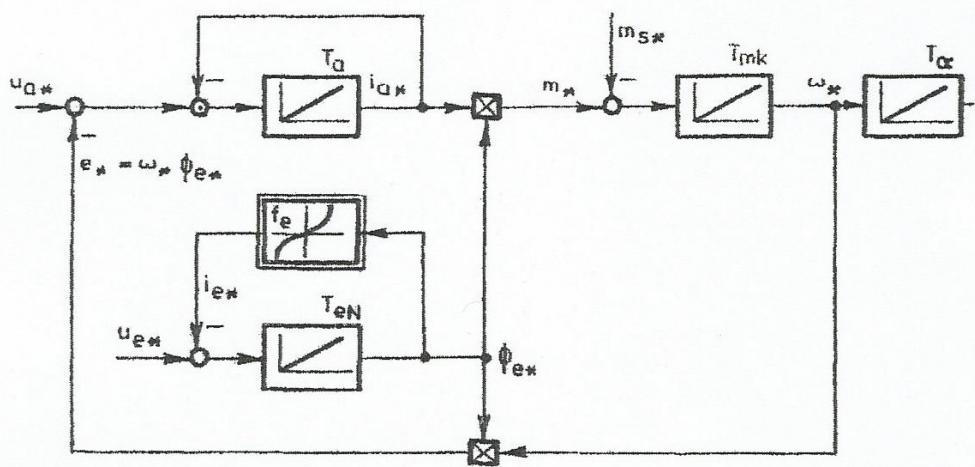


Fig. 4: Schema bloc a motorului de curent continuu cu excitatie separata (marimi relative)

#### 4 Caracteristici mecanice stationare la comanda pe indus

La comanda pe indus fluxul de excitatie se mentine constant, la valoarea nominala  $\Phi_e = \Phi_{eN}$  si se modifica tensiunea de alimentare  $u_a$ ;

Pentru  $\Phi_e = \Phi_{eN} \frac{\Phi_e}{\Phi_{en}}$  dispar astfel ambele semne de multiplicare din schema bloc.

$$\begin{aligned}\omega^* &= u_{a*} - m_{s*} \\ i_{a*} &= m_{s*}\end{aligned}$$

Caracteristicile mecanice  $W^*(m_{s*})$  reprezinta o familie de drepte, parelele cu caracteristica mecanica naturala  $u_{aN} = \frac{U_{aN}}{U_a} = 1$  avand drept parametru  $u_{a*} = \frac{U_{aN}}{U_a}$

Caracteristicile sunt valabile in toate cele patru cadrane, deci exista posibilitatea unei reversari continue a turatiei si cuplului. Caracteristicile mecanice obtinute prin variatia tensiunii de alimentare se numesc caracteristici mecanice artificiale de tensiune. Deoarece tensiunea aplicata indusului  $u$ , este raportata la valoarea sa nominala, ne intereseaza numai domeniul  $-1 \leq \frac{u_a}{u_{aN}} \leq 1$ ; la depasirea importanta a acestui domeniu se inrautatesta comutatia (apar mai intai scantei la perii si apoi, posibil, foc la colector).

Curentul prin indus (figura 5.b) este proportional cu cuplul, iar tensiunea indusului nu are nici o influenta. Cuplul este raportat la cuplul de pornire pe caracteristica mecanica naturala  $m_a$  (la motoarele mari  $m_a = (8...10)mN$ ). De aceea domeniul de functionare normal este  $-0.2 \leq \frac{m}{m_0} \leq 0.2$ .

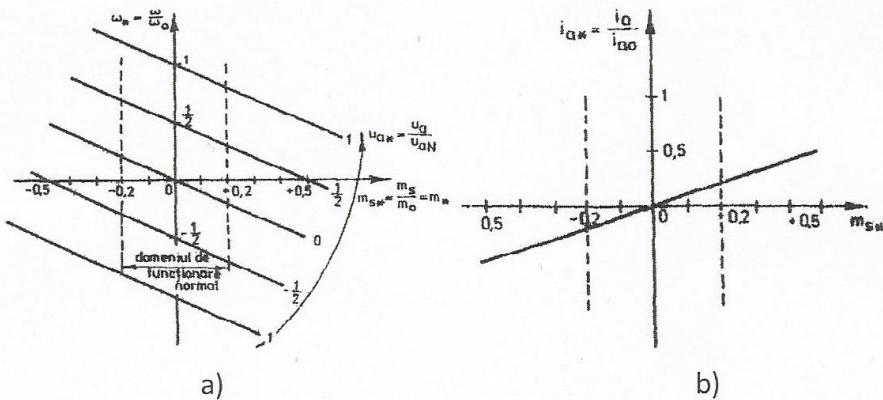


Fig. 5: Comanda pe induș a) caracteristici mecanice artificiale de tensiune b) caracteristica  $i_{a*}(m_{st})$

In afara acestui domeniu, datorita reactiei indușului  $\Phi_e(I_a)$ , caracteristicile mecanice prezentate sunt numai partial valabile; de asemenea apar probleme de comutatie.

Deoarece cuplul electromagnetic m respectiv cuplul de sarcina ma este raportat la valoarea cuplului de pornire, pe caracteristica mecanica naturala mo caracteristicile mecanice stationare la comanda pe induș (figura 5.a) apar mai inclinate decat cele reprezentate in marimi absolute si intalnite frecvent in lucrari de specialitate.

La flux de excitatie constant  $\Phi_e = \Phi_{eN}$  modificarea tensiunii indușului produce o deplasare paralela a caracteristicilor mecanice in timp ce caracteristica curent-cuplu ramane constanta. Acest lucru apare deosebit de avantajos la actionarile electrice reglabile, deoarece parametrii circuitului de reglare ramain neschimbuti; avem de-a face cu un element liniar.

## 5 Reglarea turatiei motoarelor de curent continuu

In practica, alegerea unei actionari de curent continuu este determinata in mod obisnuit de posibilitatea obtinerii unui domeniu larg de variatie a turatiei, domeniu impus de procesul tehnologic. Pentru a se obtine insa comportarea de functionare dorita, la perturbatii ale retelei, de alimentare si ale sarcinii mecanice, actionarea trebuie sa fie automatizata.

Pe de alta parte, indușul motoarelor mari prezinta o rezistenta mica si in momentul pornirii la tensiunea nominala rezulta prin induș un curent foarte mare. In functionarea stationara nu se intalneste asemenea situatie, deoarece curentul este determinat de diferența dintre tensiunea aplicata indușului si tensiunea electromotoare indusa. In regim nestationar este posibil ca, datorita unei schimbari prea rapide a tensiunii sau turatiei, sa apara un curent nepermis de mare. De aceea, pentru protejarea motorului, a sursei de alimentare, si a sarcinii mecanice se prevede o limitare rapida a curentului prin induș si deci a cuplului electromagnetic dezvoltat de motor.

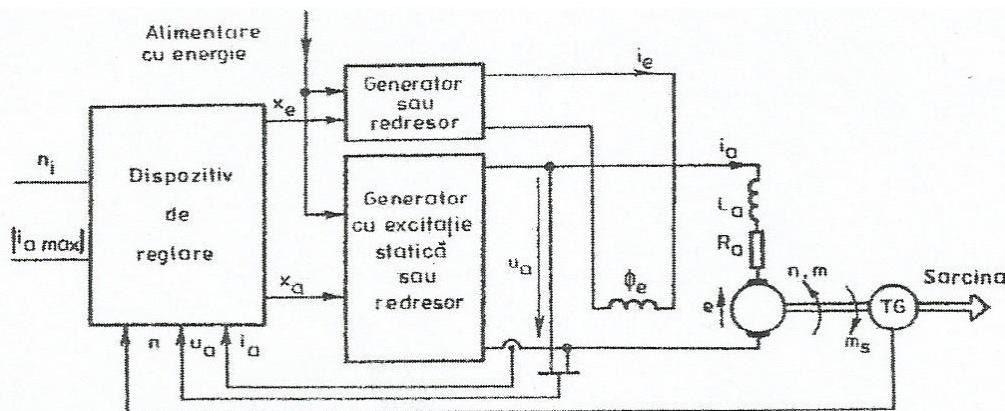


Fig. 6: Schema de principiu a unei actionari de curent continuu reglabile

## 6 Reglarea turatiei prin comanda pe indus

Pentru a se micsora supracurentul prin indus si pentru a proteja motorul, fluxul de excitatie trebuie mentinut la valoarea nominala.

In figura 7 s-a reprezentat circuitul indusului motorului si sursa de alimentare a indusului (elementul de executie). S-a notat cu ea tensiunea sursei de alimentare a indusului, comandata prin.  $x_a$ , tensiune care, datorita impedantei interne (R, L<sub>i</sub>, nu corespunde cu tensiunea  $u$ , aplicata la bornele motorului. Impedanta interna a elementului de executie trebuie luata de asemenea in considerare la definirea marimilor de referinta.

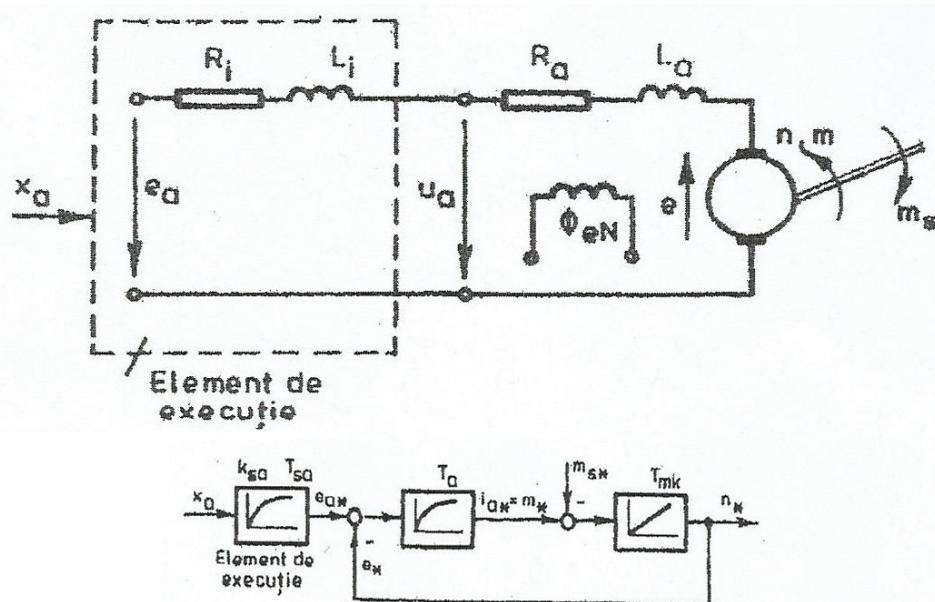


Fig. 7: Schema echivalenta a indusului motorului si a elementului de executie

$$i_a = \frac{u_{aN}}{R_a + R_i} \quad T_a = \frac{L_a + L_i}{R_a + R_i}$$

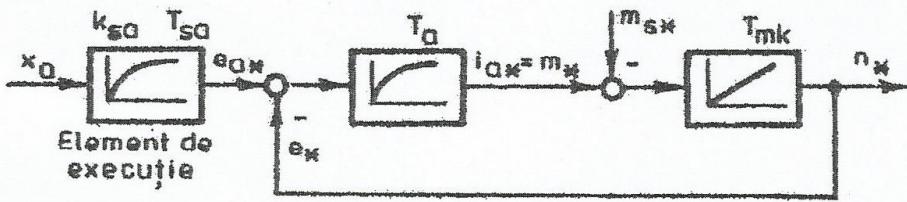


Fig. 8: Schema bloc a sistemului motor de curent continuu cu excitatie separata

Pentru sursa de tensiune comandata a indusului s-a considerat un element inertial de ordinul intai (cu amplificarea  $k_{sa}$  si constanta de timp  $T_{sa}$ ). Valoarea constantei de timp  $T_{sa}$  la un redresor comandat are valoarea de  $(1. \dots 5)ms$ . Constanta de timp a indusului  $T_a$  are inmod obisnuit valori cuprinse intre 10 si 100 ms; ea este determinata de impedanta circuitului indusului considerand o eventuala bobina de netezire, care la alimentarea de la redresoare este necesara pentru micsorarea ondulatiei curentului.

Constanta, de timp  $T_{mk}$  se refera la momentul de inertie total al actionarii raportat la arborele motorului; ea poate varia de la ordinul milisecundelor la cateva secunde.

Pentru reglarea turatiei cu limitarea curentului prin indus, cel mai potrivit principiu de reglare este procedeul reglarii in cascada. Reglarea in cascada are cateva insusiri importante:

- permite, pe langa reglarea marimii principale (in cazul de fata turatia), limitarea marimilor auxiliare (de exemplu curentul prin indus);
- fractioneaza functia de transfer a elementului de executie si procesului in portiuni, astfel incat fiecarui regulator i se repartizeaza una sau cel mult doua constante de timp importante, ceea ce face ca optimizarea se poate realiza un regulator PID sau cu variante mai simple ale acestuia;
- permite o simetrizare a operatiilor de acordare optimala a regulatoarelor

Pentru schema bloc a motorului se pot scrie ecuatiile:

$$T_a \frac{di_{a^*}}{dt} + i_{a^*} = e_{a^*} - e_* \quad (9)$$

$$e_* = n_* \quad (10)$$

$$T_{mk} \frac{dn_*}{dt} = m_* - m_{s^*} \quad (11)$$

$$i_{a^*} = m_* \quad (12)$$

Pe baza ecuatii lor de mai sus cu notatiile:  $E_a(s) = Le_a*$ ;  $N(s) = Ln*$  rezulta schema bloc a motorului reprezentata in figura 9. Utilizand calculul operational ecuatiile (9) ... (12) devin:

$$I_a(s)(a + sT_a) = E_a(s) - E(s) \quad (13)$$

$$E(s) = N(s) \quad (14)$$

$$sT_{mk}N(s) = M(s) - M_s(s) \quad (15)$$

$$I_a(s) = M(s) \quad (16)$$

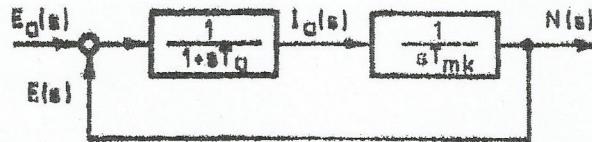


Fig. 9: Schema in lant a motorului de curent continuu cu excitatie separata

Conform figurii 9 functiile de transfer pe parti sunt:

$$\frac{I_a(s)}{E_a(s)} = \frac{\frac{1}{1+sT_a}}{1 + \frac{1}{sT_a} + \frac{1}{sT_{mk}}} = \frac{sT_{mk}}{1 + sT_{mk} + s^2T_aT_{mk}} \quad (17)$$

$$\frac{N(s)}{I_a(s)} = \frac{1}{sT_{mk}} \quad (18)$$

Din relatiile (13) ... (16) rezulta:

$$X_i(s) = E_a(s) + \frac{M_s(s)}{sT_{mk}} = \frac{1 + sT_{mk} + s^2T_aT_{mk}}{sT_{mk}} I_a(s) \quad (19)$$

Schema bloc in lant corespunzatoare ecuatiei (12) este reprezentata in figura 10. Pe baza acestor rezultate, trecand din nou la reprezentarea prin functii tranzistorii, rezulta schema bloc a sistemului motor - element de executie (figura 11). In aceasta situatie reactia din bucla (figura 8) dispare. Se observa ca, cuplul de sarcina m.actioneaza in doua locuri. Marimile care nu au fost marcate nu au nici un sens fizic. Partea de reglare cuprinsa intre ea\* si ia\* (figura 12) poate fi descrisa prin functia de transfer:

$$\frac{I_a(s)}{E_a(s)} = \frac{sT_{mk}}{1+sT_{mk}+s^2T_aT_{mk}}$$

Trebuie observat ca efectul de diferențiere este urmarea compensarilor tensiunilor ea și la mersul în got. Polinomul de la numitor poate prezenta poli reali sau complecsi conjugati.

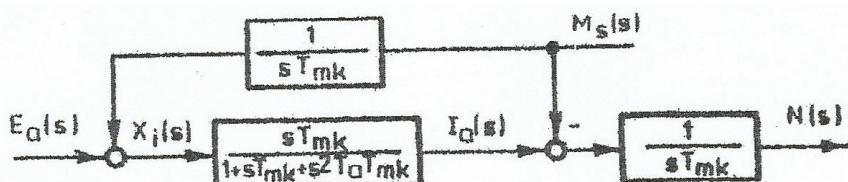


Fig. 10: Schema in lant a motorului de c.c. cu excitatie separata pentru  $M_s(s) \neq 0$

Potrivit principiului reglarii in cascada, marimea care trebuie limitata este mentionata sub control printr-un circuit de reglare interior. In. figura 11 este prezentata disponerea acestui circuit. Valoarea

reală a curentului este sesizată printr-un traductor și este supusă unei neteziri. În cele mai multe cazuri o constantă de timp  $T_t$  de 5 ms este suficientă.

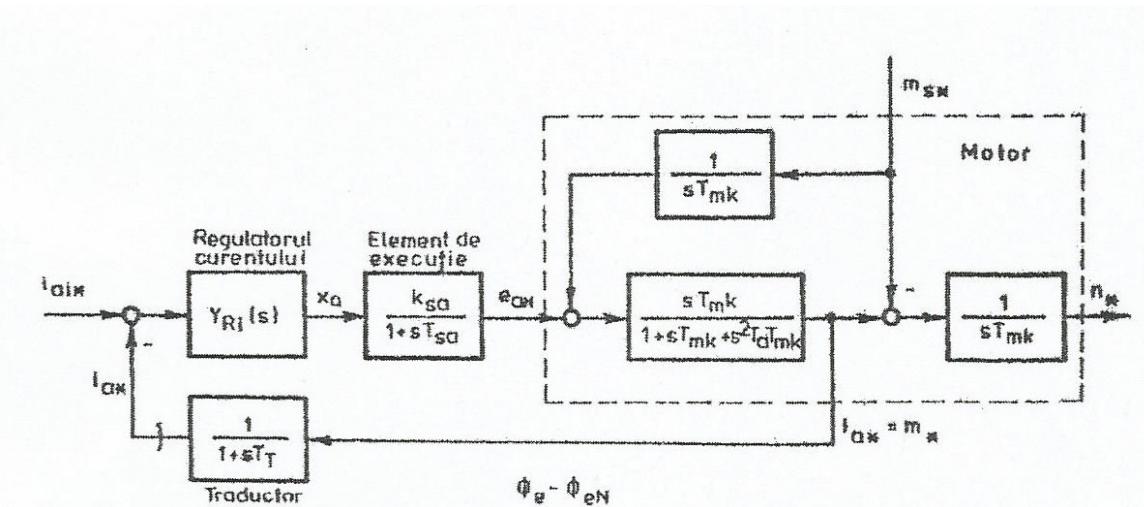


Fig. 11: Dispunerea circuitului de reglare a curentului la un sistem de actionare motor de c.c. cu excitatie separata - element de executie.

Dacă se folosește un redresor comandat ca element de execuție, ca regulator al curentului este suficient un regulator PI. Schemele de reglare a actionarilor electrice trebuie să permită și pornirea automată a motorului. Pentru a alimenta cu curent constant un motor care porneste în gol - din cauza turatiei care crește liniar în timp - este necesara o tensiune crescatoare. Dar o asemenea mare de ieșire variabilă în timp pretinde la un regulator simplu integral sau abatere de reglare. În cazurile practice nu deranjează faptul că circuitul de reglare a curentului prezintă o eroare de reglare interior.

Dimensionarea regulatorului curentului se realizează conform procedurilor obisnuite din tehnica reglării. Pentru acordarea optimă a regulatorului curentului se utilizează varianta Kessler a criteriului modulului.

Circuitul de reglare a curentului, astfel dimensionat, se introduce (figura 12) în circuitul supraordonat de reglare a turatiei; în ipoteza unei bune amortizări în circuitul de reglare a curentului să se aproximeze printr-un element inertial de ordinul întâi având constantă de timp  $T_i$  și factorul de amplificare  $k_i$ , (figura 12).

Constanta de timp  $T_i$  va fi:

$$T_i = 2T_{\Sigma i} = 2(T_{sa} + T_{\gamma}) \quad (20)$$

Iar factorul de amplificare:

$$k_i = \frac{i_{a \max}}{U_{sat}} \quad (21)$$

Unde:

- $i_{a \max}$  - valoarea limită a curentului prin inducție
- $U_{sat}$  - tensiunea de saturare a regulatorului precedent (regulatorul turatiei)

Pentru circuitul de reglare a turatiei se ia de asemenea in considerare un regulator PI. Rezulta astfel functia de transfer a circuitului deschis (figura 12).

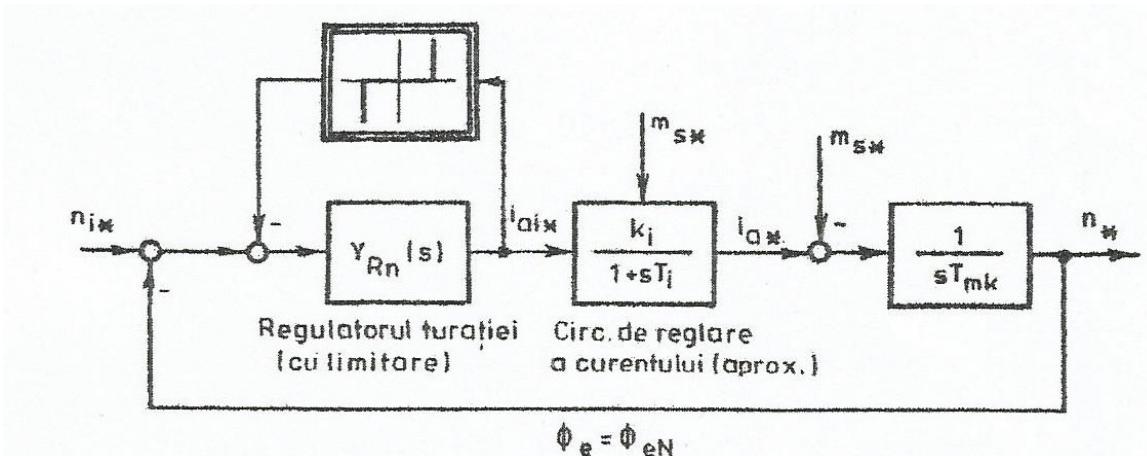


Fig. 12: Dispunerea circuitului de reglare a turatiei la un sistem de actionare motor e.e. cu excitatie separata- element de executie

$$Y_n(s) \equiv k_{Rn} \frac{1 + sT_{in}}{sT_{in}} \frac{k_i}{1 + sT_i} \frac{1}{sT_{mk}} \quad (22)$$

Acordarea optima a regulatorului, adica determinarea parametrilor  $k_{Rn}$  si  $T_{in}$ , se efectueaza conform criteriului simetriei. In figura 12 regulatorul turatie, este prevazut cu o reactie neliniara; aceasta impiedica cresterea valorii impuse a curentului  $I_{ai}^*$  peste valoarea limita  $T_{ia} \max^*$ . In acest fel se protejeaza instalatia de alimentare impotriva supraincarcarii. Limitarea valorii impuse a curentului permite de asemenea sa se dea o variatie oarecare a valorii impuse a turatiei.

## 7 Breviar de calcul

## **Bibliografie**

- [1] I. Topa, *Automatizarea actionarilor electrice*. Universitatea Transilvania Brasov, 1980.
- [2] I. Topa, *Actionari electrice si automatizari*. Editura didactica si pedagogica Bucuresti, 1980.
- [3] *Elemente de executie electrice*. Editura Matrix Romania Bucuresti, 2005.
- [4] *Actionari electrice reglabile cu masini de curent contunuu*. Editura Matrix Romania Bucuresti, 2005.
- [5] S. Dan, *Teoria sistemelor*. Editura Matrix Romania Bucuresti, 2005.